BL Lac 天体 CGRaBS J0141-092 的光变特性分析*

常鑫[1,2]，易庭丰[1,2]，杨星[3,2]，龚云露[4]，张加健[1]，毛李胜[1]

(1 云南师范大学 物理与电子信息学院，云南 昆明 650500；2 广西相对论天体物理重点实验室 广西 南宁 530004；3 广西大学物理科学与工程技术学院 广西 南宁 530004；4 云南大学物理科学与天文学院 云南 昆明 650500)

摘 要：Owens Valley Radio Observatory (OVRO)40 米望远镜的观测数据显示了 BL Lac 天体 CGRaBS J0141-0928 在 15 GHz 射电波段的剧烈光变. 我们利用 Lomb-Scargle-Periodogram (LSP)方法和加权小波 Z 变换(Weight Wavelet Z-transform，WWZ)方法以及 Jurkevich 方法分析了 CGRaBS J0141-0928 的光变周期, 结果显示该天体具有约为 649 天的准周期振荡(Quasi-Periodic OScillation, QPO), 其置信度为 4.4σ, 其准周期振荡可能是由喷流的螺旋运动产生. 我们用双指数函数拟合了其中 2 个爆发的过程, 从而得到其光变时标, 进而估算其平均多普勒因子为 3.8, 这表明 CGRaBS J0141-0928 在射电辐射波段存在显著的聚束效应. 采用 DCF(Discrete Correlation Function) 方法对射电波段分别与 Gamma-ray、光学 R 波段的光变相关性进行分析, 发现光学光变与射电光变有强相关性，且光学光变超前于射电光变66 ± 40天.

关键词：CGRaBS J0141-0928；LSP 方法；加权小波 Z 变换方法；Jurkevich 方法；多普勒因子

中图分类号：P141.5　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**

0 引言

耀变体（Blazar）是活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGNs) 中性质较为特殊的子类，其相对论性喷流几乎正对着地球。耀变体具有极端的观测特性，包括高光度、高偏振、快速光变，以及从射电到高能 γ 射线的非热连续辐射[1]。耀变体的两个子类分别是平谱射电耀变体（FSRQ）和蝎虎座 BL 型天体（BL Lac）[2]。其中 BL Lac 天体的光谱只有一些微弱的发射线或者没有发射线，但是有很强的 X 射线及 γ 射线辐射[3]。研究发现，一些 BL Lac 天体的长期尺度变化是周期性的，且不同波段之间可能存在不同的联系。通过对 BL Lac 天体光变的观测和研究能获得天体的物理机制，辐射过程和内部结构参数等重要信息[4]，对活动星系核的探索和了解有重要意义。

CGRaBS J0141-0928 是一颗红移为 0.733 的耀变体[5]，分析 BL Lac 天体光变周期的方法有很多，最常用的有自相关函数分析及周期拟合法，时间序列的功率谱分析方法，Jurkevich 方法，这些方法都十分广泛的应用在 BL Lac 天体的长周期光变观测与研究中[6]。本文分别使用 Lomb-Scargle periodogram 方法，加权小波 Z 变换方法和 Jurkevich 方法对 CGRaBS J0141-0928 天体 15 GHz 射电波段的光变周期进行研究。利用双指数函数拟合了爆发过程，并估算了多普勒因子。使用离散相关函数(DCF)方法分析了 γ 和射电波段，以及光学和射电波段的相关性[7]，其中 LSP 方法和加权小波 Z 变换法是初次用于研究 CGRaBS J0141-0928 天体的光变周期。

---

*基金项目：国家自然科学基金(11863007,12063007)资助;云南省高校高能天体物理重点实验室资助.

收稿日期：

作者简介：常鑫,男,硕士研究生,研究方向:活动星系核.Email:961475570@qq.com

通讯作者：易庭丰,男,副教授,研究方向:活动星系核. Email:yitingfeng98@163.com

这三种方法都非常适合处理非等间隔数据，得到的结果是比较稳定的周期。

1 样本和光变曲线

美国欧文斯谷射电天文台(Owens Valley Radio Observatory, OVRO)的 40m 望远镜是全球观测耀变体理想的设施(https://sites.astro.caltech.edu/ovroblazars/)。如图 1 是来自于 (OVRO)40 米望远镜 BL Lac 天体 CGRaBS J0141-0928 在 15 GHz 射电波段的光变曲线，其中有 575 个数据点。从光变曲线可以看出：CGRaBS J0141-0928 在射电波段的活动非常激烈，流量随着时间波动起伏，除了在 2010 年、2013 年、2015 年、2017 年和 2019 年有五次明显的大爆发外，还可以看到有一些不同程度的小爆发（光变曲线的尖峰处）。我们通过计算光变幅度 Amp[8]来判断天体的活跃程度：

$$Amp = 100 \times \sqrt{(A_{max} - A_{min})^2 - 2\delta^2}\ percent. \quad (1)$$

其中 A_{max} 和 A_{min} 分别表示流量的最大值和最小值，Amp 值越大表示天体越活跃。计算得到 PKS 0139-097 天体在射电波段的光变幅度为 62.7，表明 CGRaBS J0141-0928 是个非常活跃的天体。由于受观测条件的限制，光变曲线数据不连续，因此周期性分析是受到限制的。

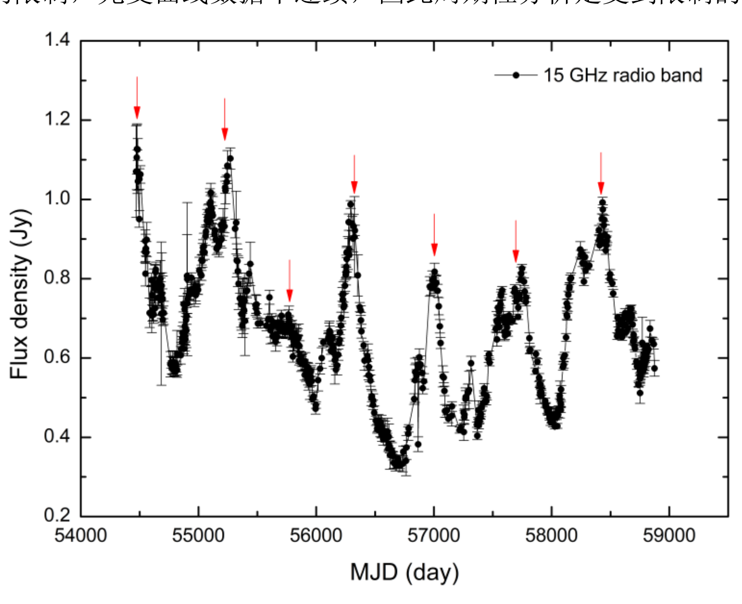


图 1 CGRaBS J0141-0928 在射电波段的光变曲线

Fig.1 The light curves of CGRaBS J0141-0928 at radio band

2 周期分析

2.1 Lomb-Scargle periodogram (LSP) 方法

Lomb-Scargle periodogram（LSP）是一种广泛用于寻找准周期振荡的方法（Lomb1976；Scargle 1982；Press et al.1992），由 Lomb 发展，经过 Scargle 进一步改进。LSP 方法不仅能在一定程度上减弱时域序列的不均匀性产生的虚假信号，还可以有效地从时域序列中提取出弱周期信号[9]。因此，LSP 方法能很好的寻找隐藏在噪声中的准周期振荡光变。LSP 方法的基本原理是基于傅立叶变换，将一系列三角函数的线性组合 $y = a\cos\omega t + b\sin\omega t$ 通过最小二乘法来拟合时间序列，将信号特征从时域转换到频域上。基本公式如下[10-11]：

$$P_{LS}(f)=\frac{1}{2}\left\{\frac{\left[\sum_{i=1}^{N_0}x(t_i)\cos\omega(t_i-\tau)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N_0}\cos^2\omega(t_j-\tau)}+\frac{\left[\sum_{i=1}^{N_0}x(t_i)\sin\omega(t_i-\tau)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N_0}\sin^2\omega(t_i-\tau)}\right\} \tag{2}$$

其中 τ 为对应时间 t 的相位修正，计算公式为：

$$\tan(2\omega\tau)=\frac{\sum_{i=1}^{N_0}\sin(2\omega t_i)}{\sum_{i=1}^{N_0}\cos(2\omega t_i)} \tag{3}$$

LSP 方法在对正弦型和数据间隔差距较小的时间序列进行周期分析时有较好的处理效果。为了验证 LSP 方法计算准周期的正确性，我们首先对周期图进行幂率拟合，得到幂率指数 β 如图 2。然后我们计算了 CGRaBS J0141-0928 的置信度，结果如图 3 所示。图 3 中，绿色线表示准周期图，其峰值为准周期结果；蓝色、红色、紫色线分别代表蒙特卡罗模拟的 95%、99%、99.7%置信度。图 3 中的绿线有一个明显的峰值为 649 天，并且峰的置信度超过了 99.7%，说明峰值结果是可靠的，所以取 649 天约为 1.78 年作为 CGRaBS J0141-0928 天体的准周期结果。

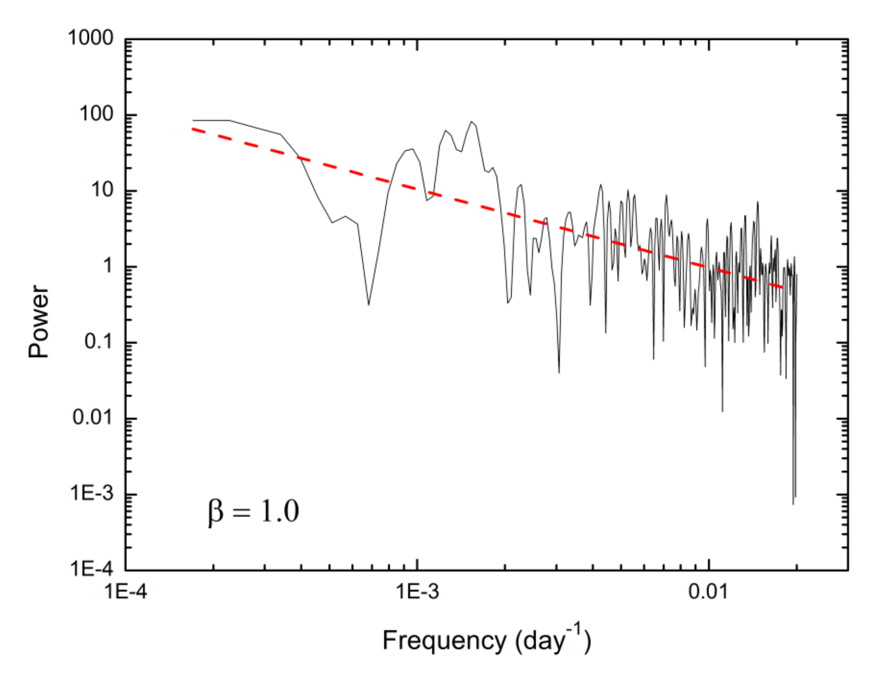


图 2 CGRaBS J0141-0928 天体在射电波段的对数幂率谱

Fig.2 CGRaBS J0141-0928 object logpower spectrum in radio band

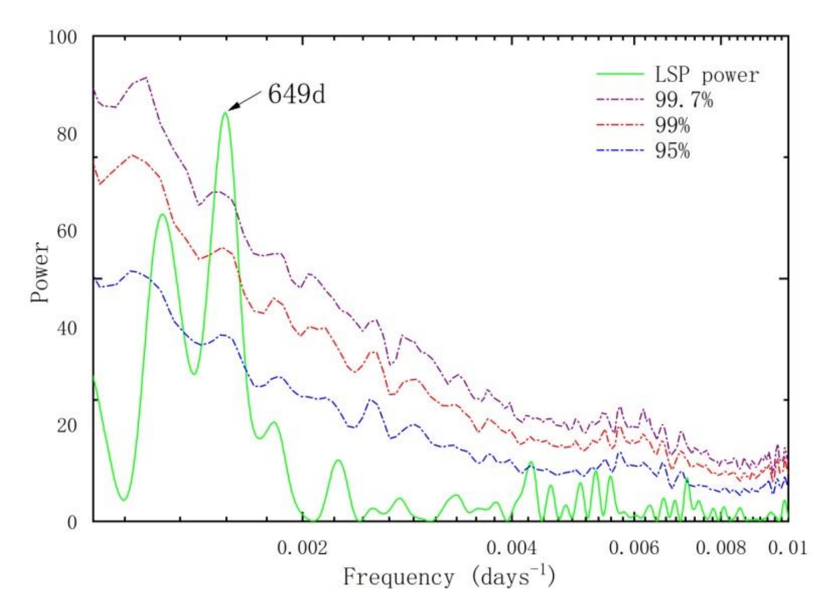


图 3 CGRaBS J0141-0928 天体在射电波段的蒙特卡罗模拟分析结果

Fig.3 CGRaBS J0141-0928 object Monte Carlo simulation analysis results in radio band

2.2 加权小波 Z 变换方法

小波分析（Wavelet Aanlysis）方法是一种新的分析方法，是纯粹数学和应用数学的结合。Morlet 小波是高斯包络下的单频复正弦函数，是一种复小波。利用 Morlet 小波作为小波母函数进行变换，根据复 Morlet 小波[12]：

$$\psi(\mathrm{t})=e^{-t^2/2}\left(e^{iw_0t}-e^{-w_0/2}\right), \qquad (4)$$

其中 ω_0 是衰减因子。

当 ω_0 取较大值时，Morlet 小波简化为：

$$\psi(\mathrm{t})=e^{-t^2/2}e^{i\omega_0 t}, \qquad (5)$$

经过伸缩 a 和平移 b 变换，(5)式变为：

$$\psi\left(\frac{\mathrm{t-b}}{a}\right)=e^{-\frac{(t-b)^2}{2a^2}}e^{iw_0\left(\frac{t-b}{a}\right)}, \qquad (6)$$

变形得：

$$\varphi(\mathrm{t})=e^{iw_m(t-b)-cw_m{}^2(t-b)^2}. \qquad (7)$$

其中 $W_m=W_0/a, c=1/2W_0^2$.

根据向量投影的方法，可以认为(7)式是一种加权映射，它以 $\phi(t) = e^{i\omega m(t-b)}$ 为基函数，$w\alpha = e^{-c\omega m2(t\alpha-b)2}$ 为统计权重因子。另外引入一个常数函数 L(t) = 1,可以得到向量空间的 3 个基函数：

$$\phi_1(t) = L(t), \qquad (8)$$

$$\phi_2(t) = \cos(\omega_m(t-b)), \qquad (9)$$

$$\phi_3(t) = \sin(\omega_m(t-b)), \qquad (10)$$

将数据向量 x(t)投影到这 3 个基函数上,得：

$$y(t)=\sum_{a=1}^{3}y_a\varphi_a(t). \qquad (11)$$

y_a的计算式为：

$$y_a = \sum_{b=1}^{3} S_{ab}^{-1} \langle \varphi_b | x \rangle. \tag{12}$$

其中 $S_{ab}=\langle \varphi_a | \varphi_b \rangle$.

根据上述过程，Foster 定义了加权小波变换(WWT) [13]：

$$WWT = \frac{(N_{\rm eff} - 1)V_y}{2V_x}, \tag{13}$$

其中 $N_{\rm eff} = \frac{\left(\sum \omega_\alpha\right)^2}{\sum \omega_\alpha{}^2}, V_x = \frac{\sum\limits_\alpha \omega_\alpha x^2(t_\alpha)}{\sum\limits_\beta \omega_\beta} - \left[\frac{\sum\limits_\alpha \omega_\alpha x(t_\alpha)}{\sum\limits_\beta \omega_\beta}\right]^2, V_y = \frac{\sum\limits_\alpha \omega_\alpha y^2(t_\alpha)}{\sum\limits_\beta \omega_\beta} - \left[\frac{\sum\limits_\alpha \omega_\alpha y(t_\alpha)}{\sum\limits_\beta \omega_\beta}\right]^2$.

由于小波形状产生变化，低频部分的有效数据 $N_{\rm eff}$ 会多于高频部分的有效数据，因此 WWT 的值会偏向高频部分，使得结果出现偏差。于是 Foster 根据 Z 统计量定义了加权小波 Z 变换为[14]：

$$Z = \frac{(N_{\rm eff} - 3)V_y}{2(V_x - V_y)}, \tag{14}$$

它满足 F 分布，自由度为 3 和 2，期望值为 1。利用(14)式可以得到如图 4 的周期性图，在 WWZ 图中，频率轴上的 WWZ 值表示数据向量的周期性，时间轴上的 WWZ 值则表示数据向量随时间的波动情况[15]。根据 WWZ 图的极大值可以确定天体光变曲线的周期。图中的蓝色、红色、紫色线分别代表 95%、99%、99.7%置信度。从图 4 中可以得到 CGRaBS J0141-0928 天体射电波段的光变周期约为 636 天，并且置信度超过了 99.7%。

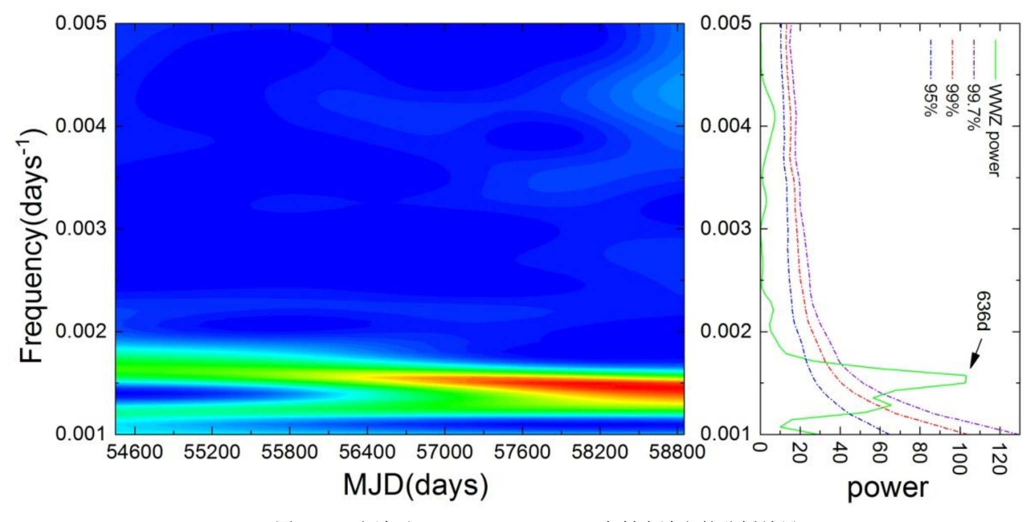


图 4 WWZ 方法对 CGRaBS J0141-0928 在射电波段的分析结果

Fig.4 WWZ test result for period search in CGRaBS J0141-0928 at radio band

2.3 Jurkevich 方法

Jurkevich 方法[35]由 Jurkevich 提出于 1971 年，是一种基于期待值的均方差的周期算法，通过测试周期来折叠数据，适用于观测数据不均匀的天体光变周期。假设有 N 个观测的样本数

据，每次的测量值为 X_i，$\bar{X}$为所有样本的平均值，V^2为测量数据样本的方差，S^2为标准差，则有：

$$\bar{X}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_i,\quad(15)\qquad V^2=\sum_{i=1}^{N}X_i^2-N\bar{X}^2,\quad(16)\qquad S^2=\frac{V^2}{N-1},\quad(17)$$

根据测试周期附近的相位把数据样本划分为 m 组，则第 1 组的统计参数为：

$$\bar{X}_i=\frac{1}{m_i}\sum_{i=1}^{N}X_i,\quad(18)\qquad V_i^2=\sum_{i=1}^{m_i}X_i^2-m_i\bar{X}_i^2,\quad(19)\qquad S_i^2=\frac{V_i^2}{m_i-1},\quad(20)$$

对应于 m 组的总方差为：

$$V_m^2=\sum_{i=1}^{m}V_i^2,\qquad(21)$$

当测试周期接近于真实周期时，V_m^2得到极小值。

此外，Kidger 等人[36]在 Jurkevich 方法的基础上给出了判断周期可靠性的方法，即：

$$f=\frac{1-V_m^2}{V_m^2}\qquad(22)$$

V_m^2是归一化之后的值。通常在 $f\geqslant 0.25$ 时，表明光变可能具有周期性，当 $f\geqslant 0.5$ 时，表明有非常显著的周期。

通过 Jurkevich 方法，对天体 PKS 0139-097 射电波段光变曲线的分析结果如图 5。图 5 中的绿色线以下代表 $f\geqslant 0.25$ 时的置信度，红色线以下代表 $f\geqslant 0.5$ 时的置信度。寻找周期时，一般满足以下两个条件的周期比较可靠，一是分析的数据样本时间跨度大于周期的六倍，二是作出的曲线有明显的振幅。从图 5 中可以看出，对应于 V_m^2 的最小值，CGRaBS J0141-0928 的射电波段可能存在 650 天的比较可靠的周期，对应的 f 值为 0.37。Jurkevich 方法获得的 650 天周期的结果和 LSP 方法以及 WWZ 方法的结果非常接近。650 天以后的极小值的周期结果明显不满足以上两个条件，所以不予采纳。

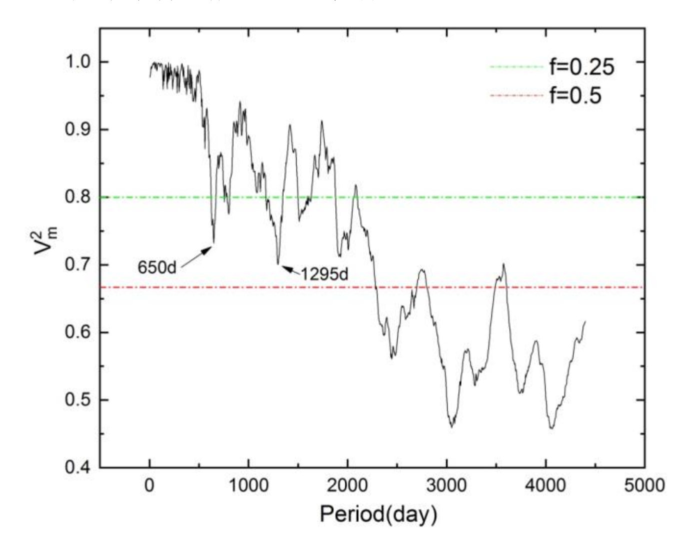


图 5 Jurkevich 方法对 CGRaBS J0141-0928 在射电波段的分析结果

Fig.5 The normalized Jurkevich test result for period search in CGRaBS J0141-0928 at radio band

3 多普勒因子分析

我们从射电的光变曲线中挑选出 2 个包含上升和下降阶段的爆发过程，分别为MJD时间56167.4-56410.7和56762.8-57228.5。我们使用双指数函数爆发拟合公式[33,34]来拟合这2个爆发过程。双指数函数公式如下：

$$F(t)=F_c+F_0\left(e^{\frac{t_0-t}{t_r}}+e^{\frac{t-t_0}{t_d}}\right)^{-1}, \tag{23}$$

公式(23)中，F_c表示基底流量，t_0表示峰对应的时间，t_r和t_d分别表示指数上升和下降的时标，F_0衡量爆发的幅度。

双指数函数拟合的2个爆发过程如图6所示。每个爆发过程的拟合参数如表1，第1列为约化儒略日的范围； 第2列为拟合所得的约化最小残差平方和；第3列为拟合峰值对应的约化儒略日及误差；第4列为基底流量及误差；第5列为爆发的幅度及误差；第6列和第7列分别为指数上升时标和下降时标及误差；第8列为每个爆发过程所对应的多普勒因子。另外，在图6中的右图中可以看到一个额外的小峰，这很可能是由于相对论喷流中的激波产生的耀斑导致的[43]。

多普勒因子(δ)与喷流中物质流速度和视角有关，但是这两个量都是不可直接观测的量，故用间接方法来估算多普勒因子是有必要的，其中通过射电光变估算多普勒因子(δ_R)相对比较准确[27-29]。假定光变化是内禀的，基于光变时标所限定的源的线度大小，文[30]给出了耀变体亮温度的计算公式：

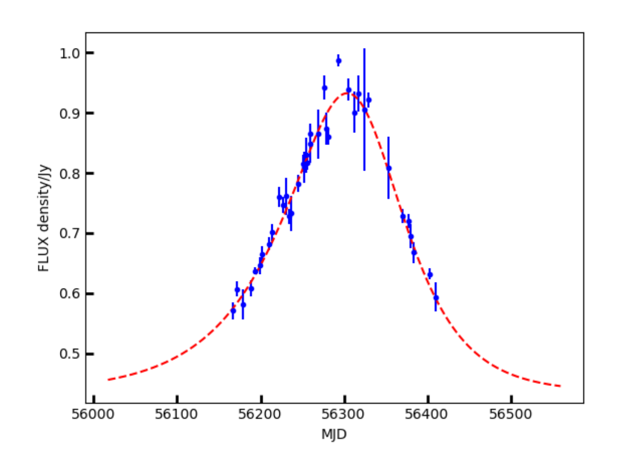
$$T_b=\left(4.5\times10^{10}\right)\Delta F\left[\frac{\lambda D}{t_{ob}(z+1)}\right]^2 K \tag{24}$$

式中，T_b为亮温度，$\triangle F$是以Jy计的流量变化值，t_{ob}是以天计的光变时标，λ是以厘米计的观测波长，D 是以百万秒差距(Mpc)计的光度距离(采用宇宙学参数 H_0 =72 km $s^{-1}Mpc^{-1}$ 和 Ω_m=0.3)。

一般认为耀变体的喷流成分对应的亮温度 T_b 不能超过平衡亮温度 T_{eq}=5×10^{10}K [31]。我们计算出来的亮温度为 T_b=2.574×10^{12}K 和 T_b=2.923×10^{12}K，超过平衡亮温度几个量级，表明存在显著的多普勒增亮效应。类似文[28]，我们选择 T_{eq} 作为内禀亮温度。利用如下公式，进一步估算了射电波段的光变多普勒因子：

$$\delta_R=\left(\frac{T_b}{T_{eq}}\right)^{1/3} \tag{25}$$

由(25)式得到多普勒因子δ_R的值分别为 3.72 和 3.88，平均值约为 3.8，Fan 等人[32]估算出了γ-ray 的多普勒因子 δ=5.50，其结果和我们估算的多普勒因子比较接近。



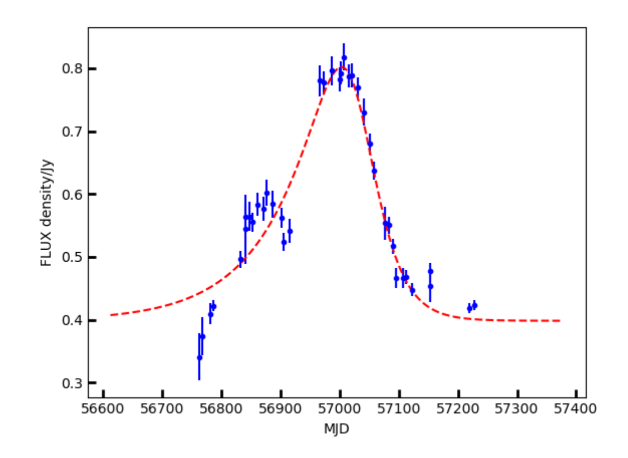


图 6 双指数函数对 CGRaBS J0141-0928 的 2 个爆发（flare）过程的曲线拟合

Fig.6 The double exponential function fits the curves of the 2 burst processes of CGRaBS J0141-0928 object

表 1 爆发过程的拟合结及多普勒因子

Table1 The results of flare fitting and the Doppler factor

peak	$\widehat{\beta}$	t_0	F_c	F_0	t_r	t_d	δ_R
56167.4-56410.7	5.55e-04	56315.94±20.26	0.43±0.03	0.97±0.14	52.58±21.08	76.74±27.60	3.72
56762.8-57228.5	1.82e-03	57028.54±12.97	0.39±0.06	0.72±0.06	34.92±7.61	94.98±24.74	3.88

4 相关性分析

离散相关函数分析法(DCF)可以用来分析两组离散的数据的相关性[16-18]。该方法不需要对数据样本做任何的处理就可以判断出两组数据的相关性。DCF 方法是由 Edelson 研究时间延迟时引入的，这种方法可以通过计算时间延迟来研究天体的结构和其他性质[19]。

离散相关函数方法的定义为:如有任意两个离散数据的序列 a_i 和 b_j ，则离散相关函数的值为

$$UDCF_{ij} = \frac{(a_i - \bar{a}) \times (b_j - \bar{b})}{\sigma_a \times \sigma_b}, \qquad (26)$$

式中，$\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 分别为数据序列 a_i 和 b_j 的平均值 ，σ_a 和 σ_b 分别为相应的标准偏差。

每一个数值 $UDCF_{ij}$ 与延时 $\tau=\Delta\tau=t_j-t_i$ 有关。而对于有噪的数据，我们可以使用式子 $(\sigma_a^2-e_a^2)(\sigma_b^2-e_b^2)$ 来代替上式中的 σ_a 和 σ_b。对一给定的 τ，如果有 M 个 $UDCF_{ij}$ 满足 $\tau-\Delta\tau/2 \leqslant \Delta t_{ij} < \tau+\Delta\tau/2$，然后将这 M 个数据点求平均值得到:

$$DCF(\tau)=\frac{1}{M}\sum UDCF_{ij}. \tag{27}$$

DCF(τ)就是离散相关函数，在延时域内对延时进行区间划分，每一区间间隔为△τ，这样我们就可以得到一个非常有用的 DCF(τ)。如果在某个区间没有数据点，则 DCF(τ)不取值。当两个相关序列不相同时，可以得到离散互相关系数。当两个相关序列相同时，则得到离散自相关系数。在离散相关函数的分析图中，如果 DCF 的峰值越大，则说明两列数据的相关性越强，反之则越弱。当 DCF 的峰值在大于零的一侧时,表示数据 a 超前于数据 b，当 DCF 的峰值在小于零的一侧时，则表示数据 a 滞后于数据 b。通过离散相关函数对 CGRaBS J0141-0928 射电波段分别和来自 Fermi Gamma-ray 空间望远镜 γ 波段、来自 KAIT Fermi AGN Light-Curve Reservoir(http://herculesii.astro.berkeley.edu/kait/agn/)光学 R 波段的数据进行相关性分析，运用 Fortran 编写程序计算结果如图 7、8，图中的顶部是射电波段和 γ 波段/光学 R 波段的流量图，底部是射电波段和 γ 波段/光学 R 波段的相关性结果图，峰值越接近 1 说明相关性越好。所以从图 7 中可以看到 γ 和射电波段的 DCF 最大值为 0.3，相关性非常弱，这表明它们的辐射区域不同并且辐射过程也是不一致的；图 8 中显示光学和射电波段的 DCF 最大值达到了 0.71，光学波段超前于射电波段 16～110 天，说明它们的辐射过程是一致的。

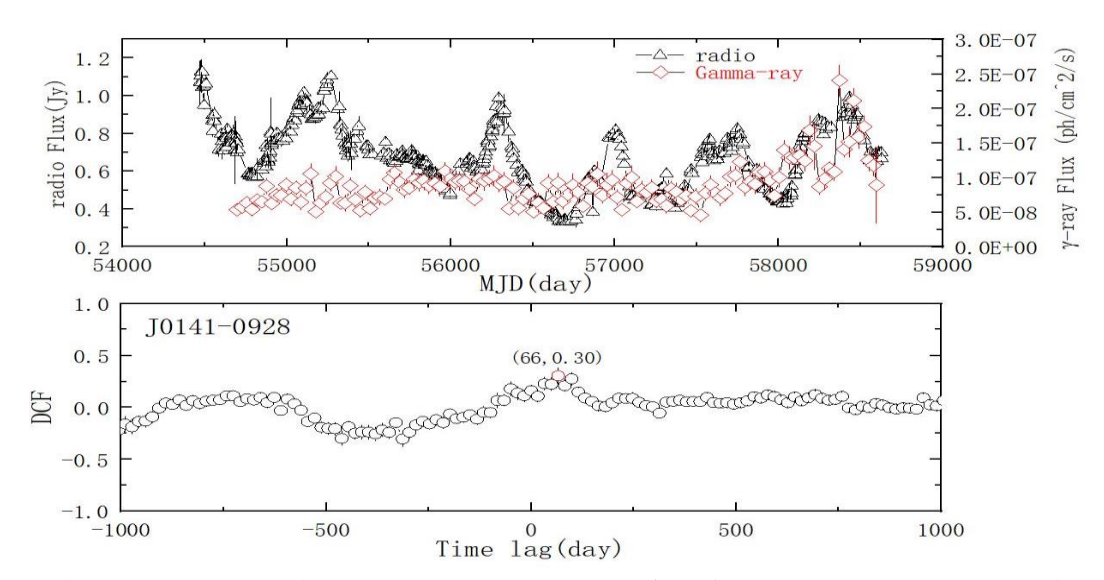


图 7 DCF 方法对 CGRaBS J0141-0928 在射电和 γ 波段的相关性分析。顶图中红色和黑色分别表示 Gamma-ray 和射电波段的光变曲线，左边标注表示射电波段的单位，右边标注表示 Gamma-ray 波段的单位。底图表示 Gamma-ray 和射电波段之间的相关性结果即 DCF 值。

Fig.7 Correlation analysis of CGRaBS J0141-0928 in radio and γ bands by DCF method

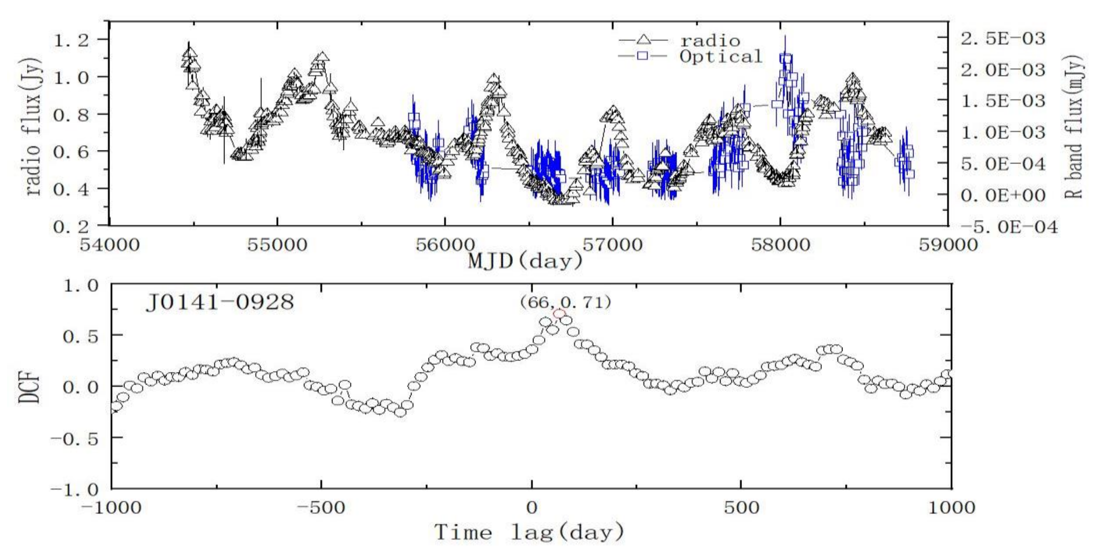


图 8 DCF 方法对 CGRaBS J0141-0928 在射电和光学 R 波段的相关性分析。顶图中蓝色和黑色分别表示 Optical 和射电波段的光变曲线，左边标注表示射电波段的单位，右边标注表示 Optical 波段的单位。底部表示 Optical 和射电波段之间的相关性结果即 DCF 值。

Fig.8 Correlation analysis of CGRaBS J0141-0928 in radio and optical R bands by DCF method

5 讨论与结论

通过收集 BL Lac 天体 CGRaBS J0141-0928 的光变数据，运用 Lomb-Scargle periodogram 方法，加权小波 Z 变换法以及 Jurkevich 方法对其射电波段的光变曲线的周期进行分析，分析的结果相互印证。Lomb-Scargle periodogram 方法分析射电波段得到的周期约为 649 天，加权小波 Z 变换法分析射电波段得到的周期大致为 636 天，Jurkevich 方法得到的周期大致为 650 天。加权小波 Z 变换法和 Jurkevich 方法的计算结果进一步支持了 CGRaBS J0141-0928 天体的射电波段有一个可靠的约为 649 天左右的光变周期。利用双指数函数我们拟合了其中 2 个爆发的过程，估算了多普勒因子 δ_R= 3.8。结果表明 CGRaBS J0141-0928 天体射电波段的辐射存在显著的聚束效应，支持了相对论性喷流模型。通过离散相关分析法对射电波段和 Gamma-ray、射电波段和光学 R 波段分别进行相关性分析，结果显示 Gamma-ray 和射电波段之间存在弱的相关性，光学 R 波段和射电波段之间存在比较强的相关性，并且光学 R 波段超前于射电波段 16~110 天。对于类星体长周期光变的物理模型现在仍然不是很清楚，为了解决这些问题提出了一些物理模型。常见的物理模型有双黑洞模型[20-21]、螺旋喷流模型[22-25]和薄盘的热不稳定性等。

CGRaBS J0141-09287 天体产生的准周期可能是由喷流的螺旋运动[37]产生的。喷流的螺旋进动由超大质量黑洞（SMBBH）系统的轨道运动驱动。Rieger 给出了实际物理驱动周期 P_d和观测准周期 P之间的关系公式为:

$$P_d \approx \frac{\gamma_b^2}{1+z} P \tag{28}$$

其中 γ_b是体洛伦兹因子，约等于 7.5[38]，z是红移。我们使用 649 天的准周期得到实际物理驱动周期 P_d≈57.71yr。另外，如果使用 γ_b=15 作为参数[39]，可以得到 P_d≈230.85yr。主黑洞和次黑洞之间的质量比为 R ≤1/3 时，称为“Major merger”（主合并）。 若质量比为 3≤R≤

10^4，则称之为“Minor merger”（次合并）[40]。无论质量比为多少，主黑洞的质量都可以用以下公式估计[41]：

$$M \approx P_d^{\frac{8}{5}} R^{\frac{3}{5}} 10^6 \mathrm{M}_\odot \quad (29)$$

其中 P_d 以年为单位，对于 SMBBH 系统的主并合，质量比可以假设为 R =3/2。将参数代入(29)式中，得到 PKS 0139-097 的主黑洞质量大约为 $M \approx 10^{8.93}$ M⊙。如果使用 γ_b=15 作为参数[42]，次并合的 SMBBH 系统的主黑洞质量为 $M \approx 10^{9.89}$ M⊙。Wu 等人[26]给出了 CGRaBS J0141-0928 天体的黑洞质量为 $M \approx 10^{9.63\pm0.70}$ M⊙，其结果和我们估算的主黑洞质量一致。

参考文献:

[1] Angel J R P , Stockman H S . Optical and Infrared Polarization of Active Extragalactic Objects[J]. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 1980, 18.

[2] Urry C Megan, Padovani Paolo. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107 (715): 803-845.

[3] Zhang Xiong, Yang Weiguo, Hou Dedong, et al. The variations characteristics and black hole mass of H0323+ 022 objects research [D]. , 2005.

[4] Xie G Z, Bai J M, Zhang X, et al. The massive black hole in the center of the active galaxy MRK 421 [J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 334: L29-L31.

[5] Pursimo T, Nilsson K, Takalo L O, et al. Deep optical imaging of radio selected BL Lacertae objects [J]. Astronomy & Astrophysics, 2002, 381(3): 810-824.

[6] Zhang Haojing, Zhang Xiong, Dong Futong, et al. Using a wavelet analysis method to calculate the variations period of BL Lac object S50716+714. Astronomy, 2009, 50 (2): 141-151.

[7] Edelson R A, Krolik J H. The discrete correlation function-A new method for analyzing unevenly sampled variability data[J]. The Astrophysical Journal, 1988, 333: 646-659.

[8] Heidt J, Wagner S J. Intraday variability in x-ray selected BL Lacertae objects. Astronomy & Astrophysics, 1997.

[9] Seperuelo Duarte E , Alencar S H P , Batalha C , et al. Spectrophotometric analysis of the T Tauri star GQ Lupi A[J]. Astronomy and Astrophysics, 2008, 489(1):349-357.

[10] Rejkuba M , Minniti D , Silva D R . Long period variables in NGC 5128 - I. Catalogue[J]. Astronomy and Astrophysics, 2003, 406(1).

[11] Yang X, Yi T F, et al. The γ-Ray and Optical Variability Analysis of the BL Lac Object 3FGL J0449.4−4350[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2020, 132(1010): 044101.

[12] 徐斌，杨涛，谭保华,等. 基于 Lomb-Scargle 算法的周期信号探测的模拟研究[J]. 核电子学与探测技术，2011(06):111-114. Xu B, Yang T, Tan B H, et al. The Simulate Study of Signal Detection Based on Lomb-Scargle Algorithm. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011(06):111-114.

[13] FOSTEＲ G．Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series［J］．AJ，1996，(112) : 1709 － 1729．

[14] FOSTEＲ G.．Time Series Analysis by Projection．I．Statistical Properties of Fourier Analysis［J］．AJ，1996，(111) :541－554．

[15] Xu Yunbing, Zhang Rongjing, Zhang Xiong. The variations period of BL Lac object is analyzed with weighted wavelet transformation [J]. Journal of Yunnan Normal University: Natural Science, 2013, 33 (5): 9-17.

[16] Gao Wei, Yang Jinxue, Li Waizhen. BL Lac object PKS 2155-304 variations Properties Analysis [J]. Journal of Yunnan Normal

University: Natural Science Edition, 2015, 35 (1): 1-4.

[17] Edelson R A, Krolik J H. The discrete correlation function - A new method for analyzing unevenly sampled variability data [J]. Astrophysical Journal, 1988, 333(134):646-659.

[18] Hufnagel B R, Bregman J N. Optical and radio variability in blazars [J]. Astrophysical Journal, 1992, 386(2):473-484.

[19] lvisM,W ikes B J,McDowell, J C, et al. A tlas of quasar energy distributions[J]. APJ. 1994, 95.

[20] Valtaoja E, Teräsranta H, Tornikoski M, et al. Radio Monitoring of OJ 287 and Binary Black Hole Models for Periodic Outbursts [J]. Astrophysical Journal, 2008, 531(2):744.

[21] Xie G Z, Liang E W, Zhou S B, et al. Photometry of three gamma-ray-loud quasars and implications for supermassive black holes[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 334(2):459-470.

[22] Rani B, Wiita P J, Gupta A C. NEARLY PERIODIC FLUCTUATIONS IN THE LONG-TERM X-RAY LIGHT CURVES OF THE BLAZARS AO 0235+164 AND 1ES 2321+419[J]. Astrophysical Journal, 2009, 696(2):2170-2178.

[23] Lainela M, Takalo L O, Sillanpää A, et al. The 65 Day Period in 3C 66A during Bright State[J]. Astrophysical Journal, 1999, 521(521):561.

[24] Villata M, Raiteri C M. Helical jets in blazars. I. The case of MKN 501[J]. Astronomy & Astrophysics, 1999, 347(1):30-36.

[25] Li H Z, Xie G Z, Chen L E, et al. The Periodicity Analysis of the Light Curve of 3C 279 and Implications for the Precession Jet[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2009, 121(885):1172-1179.

[26] Wu Z Z, Gu M F, Jiang D R. The debeamed luminosity, sychrotron peak frequency and black hole mass of BL Lac objects[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2009, 9(2): 168.

[27] Valtaoja, E., Lähteenmäki A.,Teräsranta H., et al. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. I. Decomposition of Variations into Exponential Flares[J]. ApJS, 1999, 120, 95.

[28] Lähteenmäki A., Valtaoja E., Wiik K., et al. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. II. Determining the Limiting Brightness Temperature for Synchrotron Sources[J]. ApJ, 1999, 511, 112.

[29] Liodakis I., Marchili N., Angelakis E., et al. F-GAMMA: variability Doppler factors of blazars from multiwavelength monitoring[J]. MNRAS, 2017, 466, 4625.

[30] Wagner S.J., Witzel A. Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects[J]. ARA&A, 1995, 33, 163.

[31] Readhead, Anthony C. S. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe[J]. ApJ, 1994, 426, 51.

[32] Fan J H, Yang J H, Liu Y, et al. The gamma-ray Doppler factor determinations for a Fermi blazar sample[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2013, 13(3): 25.

[33] Wagner S.J, A Witzel. Intraday variability in the BL Lac object 0954 + 658[J]. astronomy & astrophysics, 1993, 271(1):344.

[34] Ackermann M , Ajello M , Baldini L , et al. FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY OUTBURSTS FROM 3C 454.3 IN 2009 DECEMBER AND 2010 APRIL[J]. The Astrophysical Journal, 2010, 721(2):1383-1396.

[35] Jurkevich I. A method of computing periods of cyclic phenomena [J].Astrophysics and Space Science,1971,13(1):154-167.

[36] Kidger,M.R.,Takalo,L.,&Sillanp,A. A new analysis of the 11-year period in OJ287:confirmation of its existence [J]. Astronomy and Astrophysics,1992,264:32-361.

[37] Nemmen R S , Georganopoulos M , Guiriec S , et al. A Universal Scaling for the Energetics of Relativistic Jets from Black Hole Systems[J]. Science, 2012, 338(6113):1445-1448.

[38] Henri, G., & Sauge, L. The bulk Lorentz factor crisis of TeV blazars : evidence for an inhomogeneous pileup energy distribution ? [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 640(1):185.

[39] Guinevere K , Martin H . A unified model for the evolution of galaxies and quasars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2000, 311(3):576-588.

[40] Begelman M C , Blandford R D , Rees M J . Massive black hole binaries in active galactic nuclei[J]. Nature, 1980, 287(5780):307-

309.

[41] William, H, Lee, et al. Resonance in Forced Oscillations of an Accretion Disk and Kilohertz Quasi-periodic Oscillations[J]. Astrophysical Journal Letters, 2004. 603:L93–L96.

[42] Kauffmann, G., & Haelnelt, M. A unified model for the evolution of galaxies and quasars [J].2000, MNRAS,311, 576.

[43] Marscher A P, Gear W K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273[J]. Astrophysical Journal, 1985,298:114-127.

Analysis of optical property of BL Lac object CGRaBS J0141-0928

Xin Chang[1,2], Tingfeng Yi[1,2], Xing Yang[3,2], Yunlu Gong[4], Jiajian Zhang[1] Lisheng Mao[1]

(1 School of physics and electronic information，Yunnan Normal University，Kunming 650500，China; 2 Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, Nanning 530004; 3 China; School of Physical Science and Engineering Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4 School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500，China

Abstract: Observation data from the Owens Valley Radio Observatory (OVRO) 40-meter telescope showed multiple dramatic light variations in the 15 GHz radio band of the blazar CGRaBS J0141-0928. LSP (Lomb-Scargle-periodogram) method, WWZ method (Weighted Wavelet Z-transform, WWZ) and Jurkevich method are used to analyze the light variable period of CGRaBS J0141-0928. The results show that the object has a light variable period of about 649 days (4.4σ significance level), and its quasi-periodic oscillation (QPO) may be caused by the helical motion of the jet. The brightness temperature, time scale of light variability and Doppler factor were estimated by fitting the processes of two bursts with double exponential function. The Doppler factor estimated by the optical time scale of variability is 3.48, and the results show that CGRaBS J0141-0928 has a significant beaming effect in the radio radiation band. The DCF (Discrete Correlation Function) method is used to analyze the correlation between the radio band and Gamma-ray and optical R band. It is found that there is a strong correlation between optical light variability and radio light variability, and the optical light variability is 66 ± 40 days ahead of the radio variability.

Key words: CGRaBS J0141-0928; LSP method; weighted wavelet Z transformation method; DCF method; Jurkevich method; Doppler factor